

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПУЛЬП

Для анализа процессов в устройстве используется метод аналогового моделирования многослойных структур. Использование данного метода позволяет:

- определить необходимое фазное напряжение питания индуктора при заданной производительности установки и напряженности магнитного поля на поверхности индуктора;
- оценить энергетические показатели установки: потребляемые активную  $P_{ном}$  и полную  $S_{ном}$  мощности, коэффициент полезного действия  $\eta$ .

Метод аналогового моделирования многослойных структур основан на теории электромагнитного поля. В данном методе используется такой анализ полей в ограниченном объеме, который сравнительно легко и непосредственно приводит к аналоговым электрическим моделям в виде каскадных схем соединений четырехполюсников, удобных для дальнейших качественных и количественных исследований. В этом методе соединяются достоинства теории цепей и теории поля [1].

Данный метод особенно удобен для аналитического исследования характеристик электрических машин, конструкции которых предусматривают автономное изготовление участков магнитопроводов и обмоток, нетрадиционные конфигурации элементов, дополнительные зазоры, разъемные зоны и другие отклонения от привычных конструктивных схем.

Первый шаг в образовании исследуемой модели – разделение всего сложного объема машины на ряд локальных областей, для каждой из которых можно однозначно выразить граничные условия. В частности, удобным является разделение на горизонтальные слои с однородными свойствами.

На рисунке 1 условно изображена конструкция одностороннего ЛАД с изотропной вторичной шиной и осью симметрии, проходящей вдоль оси X. На рисунке показан вариант ортотропной модели, содержащей несколько очевидных слоев: А – активный зубцово-пазовый слой с усредненной плотностью тока, вектор которой направлен по оси Z; 1 – воздушный зазор; 2 – вторичная шина, 1' – ярмо.

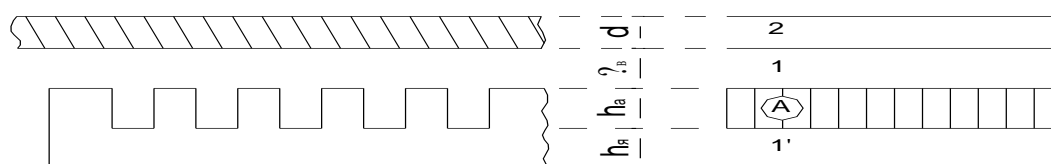


Рис. 1. Конструктивная схема ЛАД и его многослойная структура  
 с усреднёнными характеристиками

Каждой зоне или слою многослойной структуры соответствует Т-образная схема аналогового четырехполюсника, имеющая продольные и поперечный пассивные элементы. Параметры отдельного звена аналоговой схемы определяются физическими и геометрическими свойствами рассматриваемого слоя и частотой возбуждающего тока. Параметры звеньев рассчитываются по готовым формулам [1].

Зная параметры аналоговой схемы, можно определить характеристики поля для любых границ.

Для расчета электрических характеристик необходимо аналоговую схему преобразовать в электрическую схему замещения, для чего все сопротивления анало-

говой модели необходимо увеличить в  $k_n$  раз.

Коэффициент приведения аналоговой схемы к электрической схеме замещения:

$$k_n = \frac{2 \times m \times (w_\phi \times k_{об})^2 \times b}{p \times \tau}, \quad (1)$$

где  $m = 3$  – число фаз;  $w_\phi = 1400$  – число последовательно соединённых витков фазы;  $p = 4$  – число пар полюсов обмотки;  $\tau = 0,066\text{ м}$  – полюсное деление;  $b = 0,07\text{ м}$  – ширина индуктора;  $k_{об} = 1$  – обмоточный коэффициент.

$$k_n = \frac{2 \times 3 \times (1400)^2 \times 0,07}{4 \times 0,066} = 3,11 \times 10^6.$$

Установку для обезвреживания разбиваем на четыре локальные области: 1 – ярмо; 2 – активный зубцово-пазовый слой; 3 – днище короба; 4. – слой ферромагнитного материала.

Аналоговая модель данной структуры представлена на рисунке 3.

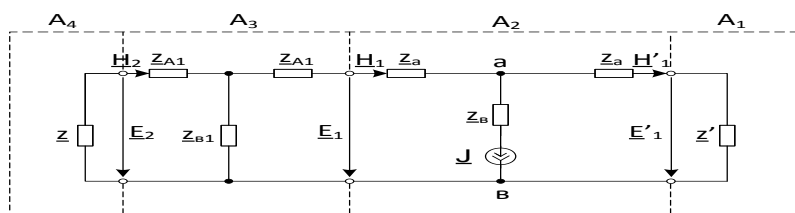


Рис. 3. Аналоговая модель

Далее приводится алгоритм и формулы для расчета параметров звеньев аналоговой модели.

**Звено  $A_4$  – слой ферромагнитного материала**

Коэффициент распространения слоя:

$$\beta_2 = \sqrt{\alpha^2 + j \times w \times s \times \mu \times \gamma}. \quad (2)$$

Принимаем:  $\alpha = \frac{\pi}{\tau} = \frac{3,14}{0,066} = 47,57$  – волновое число;  $w = 314 \text{ рад/с}$  – угловая частота;

$\mu = 5,87 \times 10^6 \text{ Гн/м}$  – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитного материала;  $\gamma = 5 \times 10^6 \text{ См/м}$  – удельная электрическая проводимость слоя;  $s = 1$  – скольжение.

**Характеристическое сопротивление четырёхполюсника  $A_4$**

$$Z_{c4} = \frac{j \times w \times \mu}{\beta_2}. \quad (3)$$

**Входное сопротивление четырёхполюсника  $A_4$**

$$Z_4 = \frac{Z_{c4}}{\text{th}(\beta_2 \times d)}, \quad (4)$$

где  $d = 0,007\text{ м}$  – толщина слоя ферромагнитного материала.

**Звено  $A_3$  – днище короба.**

Характеристическое сопротивление  $A_4$

$$Z_{c3} = j \times 0,4 \times w \times \tau \times 10^{-6}. \quad (5)$$

Входное сопротивление нагруженного четырёхполюсника  $A_3$

$$Z_3 = \frac{Z_4 + Z_{c3} \times \text{th}(\alpha \times \delta)}{Z_4 \times \text{th}(\alpha \times \delta) + Z_{c3}} \times Z_{c3}. \quad (6)$$

**Звено  $A_2$  – активный зубцово-пазовый слой. Усредненное значение магнит-**

ной проницаемости слоя

$$\mu_x \approx \mu_0 \times \frac{t_z}{b_n}, \quad (7)$$

где  $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$  - магнитная проницаемость вакуума;  $t_z = 22 \text{ мм}$  - зубцовое деление;  $b_n = 14 \text{ мм}$  - ширина паза.

Параметры Т - образного четырёхполюсника звена  $A_2$ :

$$z_a = j \times w \times \mu_x \times \frac{h_a}{2}, \quad (8)$$

где  $h_a = 0,06 \text{ м}$  - высота зубца.

$$z_b = -j \times w \times \mu_x \times \frac{h_a}{6}, \quad (9)$$

**Звено  $A_1$  - ярмо**

В большинстве практических случаев при шихтованном ярме можно допустить  $\mu_x = \mu_y = \infty$ , тогда входное сопротивление четырёхполюсника  $A_1$   $z_1 = \infty$ , что вполне согласуется с физическими представлениями, поскольку такое идеальное ярмо полностью экранирует пространство, и магнитное поле за пределы ярма не распространяется.

Входное сопротивление, рассчитанное относительно источника возбуждающего тока J:

$$z_{ex} = z_a + z_b + z_3, \quad (10)$$

Комплексное входное сопротивление электрической схемы замещения одной фазы:

$$z_\phi = r_\phi + jx_n + k_n \times z_{ex}, \quad (11)$$

где  $r_\phi$  - активное сопротивление фазы обмотки индуктора;  $k_n = 3,11 \times 10^6$  - коэффициент приведения.

$$r_\phi = P_{75} \times \frac{L_1}{q_{\phi} \times \alpha}, \quad (12)$$

где  $P_{75} = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \times \text{м}$  - удельное сопротивление меди;  $L_1 = 672 \text{ м}$  - длина провода обмотки;  $q_{\phi} = 0,883 \times 10^{-6} \text{ м}$  - сечение провода обмотки;  $\alpha = 1$  - число параллельных ветвей обмотки.

Индуктивное сопротивление лобового рассеяния:

$$x_n = 4 \times \pi \times \mu_0 \times f_1 \times w_1^2 \times \frac{b}{p \times q} \times \lambda_n, \quad (13)$$

где  $\lambda_n$  - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния;  $f_1 = 0,17 \text{ м}$  - средняя длина лобовой части с одной стороны машины;  $b = 0,07 \text{ м}$  - ширина индуктора.

$$\lambda_n = (0,175 - \frac{0,3 \times \delta}{\tau}) \times \frac{q}{b} \times (L_n - 0,64 \times \tau).$$

После определения входящих в формулу (11) величин получаем:

$$z_\phi = 18,56 + j3,1 + 3,11 \times 10^6 \times (19,98 + j57,69) \times 10^{-6} = 80,69 + j182,5 = 199,5 e^{j66,1}.$$

Коэффициент мощности:  $\cos \varphi = 0,4$ .

Напряжение, необходимое для достижения максимального фазного тока:

$$\underline{U}_\phi = (1,157 - j2,659) \times (80,69 + j182,5) = 578,6 \text{ В}.$$

Амплитуда поверхностной плотности тока:

$$\underline{J}_m = \frac{\sqrt{2} \times w_\phi \times m}{p \times \tau} \times \underline{I}_\phi; \quad (14)$$

Напряженность магнитного поля на границе между зубцово-пазовым слоем и днищем корпуса:

$$\underline{H}_1 = \underline{J}_m = (2.6 - j5.98) \times 10^4 \text{ A/M}.$$

Напряженность электрического поля на границе между зубцово-пазовым слоем и днищем корпуса:

$$\underline{E}_1 = -\underline{z}_3 \times \underline{H}_1; \quad (15)$$

$$\underline{E}_1 = (-19.98 - j45.3) \times 10^{-6} \times (2.58 - j5.96) \times 10^4 = (-3.2 + j0.022) \text{ B/M}.$$

Напряженность магнитного поля на границе между днищем корпуса и слоем ферромагнитного материала:

$$\underline{H}_2 = \underline{E}_1 \times \frac{sh(\alpha \times \delta)}{\underline{z}_{c3}} + \underline{H}_1 \times ch(\alpha \times \delta); \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \underline{H}_2 &= (-3.2 + j0.022) \times \frac{sh(47.57 \times 0.003)}{j8.289 \times 10^{-6}} + (2.58 - j5.96) \times 10^4 \times ch(47.57 \times 0.003) = \\ &= (2.63 - j0.479) \times 10^4 \text{ A/M}. \end{aligned}$$

Действующее значение напряженности магнитного поля на границе данных слоев равно принятой напряженности  $H_{on} = 0.2 \times 10^5 \text{ A/M}$ , что обеспечивает заданную производительность установки.

Напряженность электрического поля на границе между днищем корпуса и слоем ферромагнитного материала:

$$\underline{E}_2 = \underline{E}_1 \times ch(\alpha \times \delta) + \underline{z}_{c3} \times \underline{H}_1 \times sh(\alpha \times \delta); \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_2 &= (-3.2 + j0.022) \times ch(47.57 \times 0.003) + j8.298 \times 10^{-6} \times (2.58 - j5.96) \times 10^4 \times \\ &\times sh(47.57 \times 0.003) = (-3.19 - j0.048) \text{ B/M}. \end{aligned}$$

Активная мощность, поступающая в слой ферромагнитного материала

$$P_{эм.} = (-0.5 \times \text{Re}[\underline{E}_2 \times \underline{H}_2^*]) \times b \times 2 \times p \times \tau, \quad (18)$$

где  $b \times 2 \times p \times \tau$  – площадь активной поверхности индуктора.

Электромагнитная сила

$$F_{эм.} = \frac{P_{эм.}}{2 \times \tau \times f_1}; \quad (19)$$

$$F_{эм.} = \frac{780.14}{2 \times 0.066 \times 50} = 118.2 \text{ H}.$$

Активная мощность, потребляемая установкой

$$P = 3 \times V_\phi \times I_\phi \times \cos \varphi; \quad (20)$$

$$P = 3 \times 578.6 \times 2.9 \times 0.4 = 2013 \text{ Bm}.$$

Таким образом, используя метод аналогового моделирования многослойных структур, можно определить фазное напряжение питания индуктора при заданной производительности установки и напряженности магнитного поля на поверхности индуктора и оценить энергетические показатели установки.

Список использованных источников

1. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. - М: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.